

# 時空間イベント探索のための3次元情報可視化

伊藤 正彦

大規模な事故や災害などが日々発生するなか、都市計画、交通管理、インフラ整備、防災・災害対応などの観点から、大量の時空間情報を用いて時空間イベントの詳細を探索するための情報可視化システムが求められるようになってきている。本稿では、時空間情報の可視化手法に関してさまざまな手法を紹介し、それらの長所・短所をまとめ、分類する。さらに、筆者らがこれまで構築してきた時空間情報可視化に関する3次元アプリケーション群とそれらを用いたイベント探索事例を紹介する。

キーワード：3次元情報可視化、時空間情報可視化、時空間キューブ

## 1. はじめに

都市空間では、事故や災害などの事象、あるいは野球の試合やコンサートといった大規模集客イベントなど、さまざまな種類の大規模イベント（本稿では上記をすべてひっくるめてイベントと呼ぶ）が日々発生しており、発生する場所、期間および影響範囲はさまざまである。これらの大規模イベントは、人々の行動や考えに大きな影響を及ぼす。さらに、一つのイベントの影響が長時間かつ広範囲に及び、内容が変化したりほかのイベントの発生を誘発することも起こりうる。これらのような大規模かつ変化し続けるイベントを理解することは、都市計画、交通管理、インフラ整備、防災・災害対応などの観点から重要になってくる。

一方、GPSなどの物理センサから得られる実世界の事象を捉えた数値データはますます増加し、ツイッターなどのソーシャルセンサを通して人々の意見・行動を表す文章や画像は大量に流通し続けている。このような状況から、大量のデータを用いて、環境・交通システム・人々の行動などに関する時空間イベントを分析・理解するための仕組みが求められ、さまざまな対話的可視化技術が提案されている。

筆者らは、汎用的な部品の組み合わせで時系列情報の3次元可視化システムを実現するフレームワークを提案し、ソーシャルメディアやリモートセンシングによって得られたさまざまな時系列データに適用することで、可視化・探索アプリケーションを構築してきた[1]。さらに、これを拡張する形で、交通システム、あるいは

人々の行動の変化などを分析するための3次元時空間イベント探索アプリケーション群を提案してきた。

本稿では、時空間情報の可視化技術について、3次元のものを中心に過去にどのような提案がなされてきたのか、その長所、および短所とそれらの解決法も含めて紹介する。さらに、筆者らがこれまで構築した、リモートセンシング、ソーシャルメディア、および交通データの可視化に関する3次元アプリケーションの紹介とそれらを用いたイベント探索事例を紹介する。

## 2. 時空間情報可視化のさまざまな手法とその特徴

2次元での時空間可視化手法としては、アニメーションを用いた可視化[2, 3]、1軸を時間軸として用いたヒートマップあるいは折れ線グラフを地図に重畳表示する可視化[4-6]、異なる時間の可視化結果を並べるスモールマルチプル(Small Multiples)[7]を用いた可視化[3]などを用いることが多いが、それぞれ長所・短所があり目的に応じて使い分ける必要がある。

アニメーションを用いた時空間可視化は、急な変化・細かい変化を見つけるのには適しているが、長時間にわたる時間変化を俯瞰したり、時間による違いを比較することが難しい[3]。1軸を時間軸として用いたヒートマップ/折れ線グラフを用いた時空間可視化は、時間的な俯瞰には適しているが、指定した地点・領域に関する値の時間変化を地図上に重畳表示することで実現されるため、表示できる地理的な詳細度に限界がある。スモールマルチプルを用いた時空間可視化は、異なる複数時点間の空間的データの比較には適しているが、小さな時間的変化を見つけることが難しい[3]。さらに長期間の時間的変化を俯瞰するには広大な表示領域が必要になる。

また、2次元可視化は、表示可能な属性数が3次元の可視化に比較すると限定される。また、大きな値変化

いとう まさひこ  
東京大学 生産技術研究所/  
情報通信研究機構 統合ビッグデータ研究センター  
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
imash@tkl.iis.u-tokyo.ac.jp

表 1 3次元空間を用いた時空間情報可視化手法の分類と代表的な事例

3次元空間の1軸の使い方 時間表現	時間軸	標高	時間・標高以外の値	レイヤ
3次元空間の1軸	(a)[9-13]	(b)[1]	(e)[17]([1])	(h) -
アニメーション	対象外	(c)[1, 14-16]	(f)[13, 18]([1])	(i)[19]
スモールマルチプル	対象外	(d)([1])	(g)([1])	(j) -

を色で表現することは難しいが、2次元可視化では表示領域が限られることから表示オブジェクトのサイズによって異常に大きな値を表現することも難しい [8]、といった短所も指摘されている。

上記の欠点を少しでも補完すべく、さまざまな3次元可視化手法が提案されている。これらの3次元時空間可視化手法を用いた代表的な既存研究を表1に整理した<sup>1</sup>。表の各行は、時空間可視化における時間の表現手法で分類している。各列は、3次元空間における3軸の使い方として、地平面以外の1軸をどのように用いるかで分類している。

空間的な俯瞰と時間的な俯瞰を同時に実現するために、一つの空間に両方を組み合わせて表示する方法が Hägerstrand [20] により考案され、時空間キューブ (Space Time Cube) と呼ばれ広く利用されている。時空間キューブでは、3次元空間の2軸からなる平面を地図などの空間情報に割り当て、もう1軸を時間軸として利用する (表 1(a))。時空間キューブを用いたものとしては、時空間中に点をプロット [9-11]、軌跡を表示 [10, 11]、あるいは軌跡上の値の変化を壁のように表現 (3D wall map) [12, 13] するなど、さまざまな手法が提案されている。3.2節～3.4節で筆者らによるそれぞれの事例を紹介する。

Amini et al. [21] は、スライダを用いて時間を変更する2次元可視化と時空間キューブを用いた3次元可視化をさまざまなタスクを用いて比較し、未知の要素が多い複雑な探索や、時間情報の探索において時空間キューブのほうが適しているとした。一方、3次元空間では適切な視点を見つけるのが難しく、ユーザは視点の移動に多くの時間を費やすことになるとも指摘している [21]。この問題に対して、筆者らは、時空間キューブにおける最適視点抽出手法を提案している [22]。

緯度経度に加えて標高情報をもつ3次元の表示対象に対して、1軸を高さ情報に割り当てて、時間表現としてアニメーションを用いる事例は、地球環境データな

どの可視化手法として非常に一般的である [1, 14-16] (表 1(c))。

さらに、このような標高情報をもつ時空間情報に対してもスモールマルチプルを用いて異なる時点間の空間的データを比較する方法が考えられる。スモールマルチプルを生成するには、異なるパラメータ値 (この場合は異なる時間を表す値) から生成される可視化結果を複数並べて表示する環境が必要になる。スプレッドシートに3次元空間を埋め込むことにより3次元可視化のスモールマルチプルを生成可能にするシステムは複数存在 [23, 24] するが、時空間情報の3次元可視化に応じた事例は著者の知る限り存在しない。伊藤らの Time-Cube [1] は、3次元空間の1軸を時間軸として用いたうえで、時間軸上に複数の3次元可視化環境を複製し、異なる時間の可視化結果を並べる機能を実現している。さらに3次元可視化環境を時間軸上で移動することによるアニメーションも実現しており、表1の(b-d)の可視化手法を同時に実現している。詳細は3.1節で紹介する。

さらに、時間軸や標高以外に3次元空間の1軸を利用する手法も複数考えられる。一つは、3次元空間の2軸を空間情報に、残りの1軸を時間と標高以外の値に割り当てる表現手法 [1, 13, 17, 18] が考えられる。Yu et al. の iVizTRANS [17] および伊藤らの TimeSlice [1] は、時空間キューブ中に値の大きさを表示オブジェクトの高さで表現する手法を導入している (表 1(e))。Nage et al. の Staged Analysis [18] および伊藤らの AnimatedRibbon view [13] は、表示オブジェクトの高さをアニメーションで変化させることによって値の時間変化を可視化している (表 1(f))。もう一つの手法としては、3次元空間中に複数の2次元レイヤを重ねて表示し、複数種類の空間情報を同時に可視化する方法がある [19] (表 1(i))。これらの事例は3.2節、3.3節および3.5節で紹介する。

### 3. 時空間情報の3次元可視化システム事例

#### 3.1 地球観測データ3次元可視化システム

図1は、地球観測データに対するインタラクティブ3次元可視化環境の構築例である [1]。地球観測データ

<sup>1</sup> 括弧付きのものは参考文献中では分類における手法の実現例を明記していないが、3.1節および3.2節に具体的に解説をしているので参照されたい。

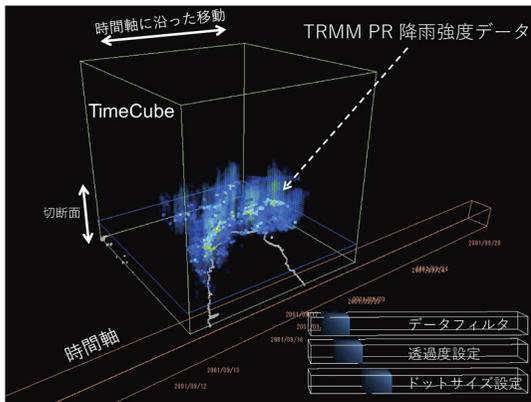


図1 台風発生シーズンにおける台湾上空の降雨量の時間変化可視化 [1]

としては、海洋地球観測探査システム：データ統合・解析システム (DIAS)<sup>2</sup> において収集された TRMM PR の降雨強度データを用いている。これは、時間、緯度、経度、高度、および濃度からなる 5 次元分布データで、TimeCube と呼ぶ 3 次元可視化のための部品を用いて可視化している。

図 1 では、横軸に時間軸オブジェクトを配置し、その横に 3 次元の空間情報可視化環境である TimeCube を配置している。TimeCube は時間軸オブジェクト上の位置に応じた時間のデータを内部に可視化する。TimeCube の内部は、底面に地図を表示し、高さは標高を表しており、緯度、経度、高度、および指定された時間に応じた濃度データを可視化している。青を低濃度、赤を高濃度にマップしている。ユーザは時間軸に沿って TimeCube を動かすことにより、指定した時間に関する降雨強度情報を可視化できる。また、手前に表示されているスライダ部品を用いることにより、濃度によるフィルタリングなどを行える。

図 1 の例では台風発生シーズンである 2001 年 9 月の台北周辺上空の降雨量の時間変化を探索している。台風シーズンに台湾の切り立った海岸線上空に向かって雨が集中している様子が読み取れる。

この事例では、3 次元空間の 1 次元を時間軸として用いている。さらに、その時間軸の中に 3 次元の降雨データが配置されており、座標系の各点に別の座標系を埋め込む手法がとられている (表 1(b))。TimeCube を時間軸に沿って動かすことで、時間変化をアニメーションで観察できる (表 1(c))。ユーザは時間軸上の任意の位置に TimeCube を追加することができ、異な

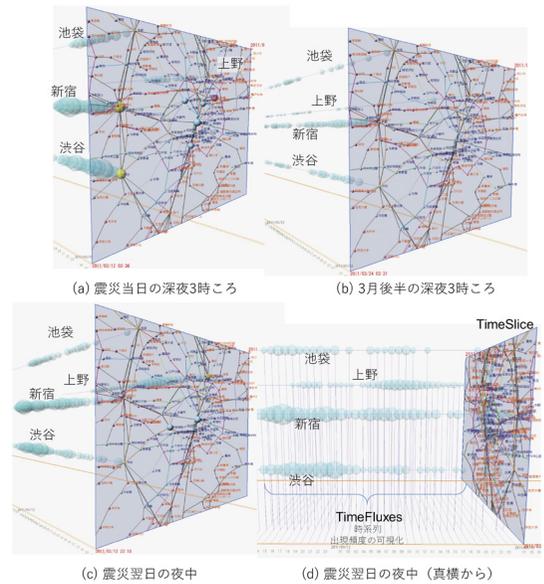


図2 2011 年 3 月 11 日震災後における東京周辺各駅に関するツイート頻度推移 [1]

る時間の可視化結果を比較できる。これは 3 次元可視化の Small Multiple を実現しているとみなすことができる (表 1(d))。複数の TimeCube の時間が近い場合、TimeCube 同士が重なり合うが、奥行き方向にスライドさせて重なりを回避できる。

### 3.2 鉄道・地下鉄路線図上の状況観測システム

図 2 は、東京近郊の鉄道・地下鉄路線図上の各駅に関連するツイートを収集、時間ごとに集約し、その頻度を各駅上に可視化した状況観測システムである [1]。選択された時間周辺におけるツイート出現頻度に応じて駅を表すノードのサイズが変化する。さらに、駅ノードを選択することで TimeFlux と呼ばれる時間軸上に時間点ごとの頻度を可視化するオブジェクトを表示し、指定駅に関するツイート数の変遷を俯瞰できる。

図 2 では 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災後の状況を可視化している。(a-b) では震災当日と数週間後の深夜 3 時頃における各駅に関するツイート数を可視化・比較している。通常、(b) のように深夜に駅に関するツイートがされることはほとんどないが、(a) から震災直後は多くの人が徹夜で駅の状況をつぶやき続けたことがわかる。(c) および (d) では震災翌日の夜中までの渋谷、新宿、上野、および池袋各駅に関するツイート数推移を TimeFlux により可視化・比較している。これにより、各駅の時間帯による傾向の違いとピーク点を直感的に理解可能になる。渋谷駅では震災当日深夜になるとツイート数が急激に減少して

<sup>2</sup> <http://www.diasjp.net/>

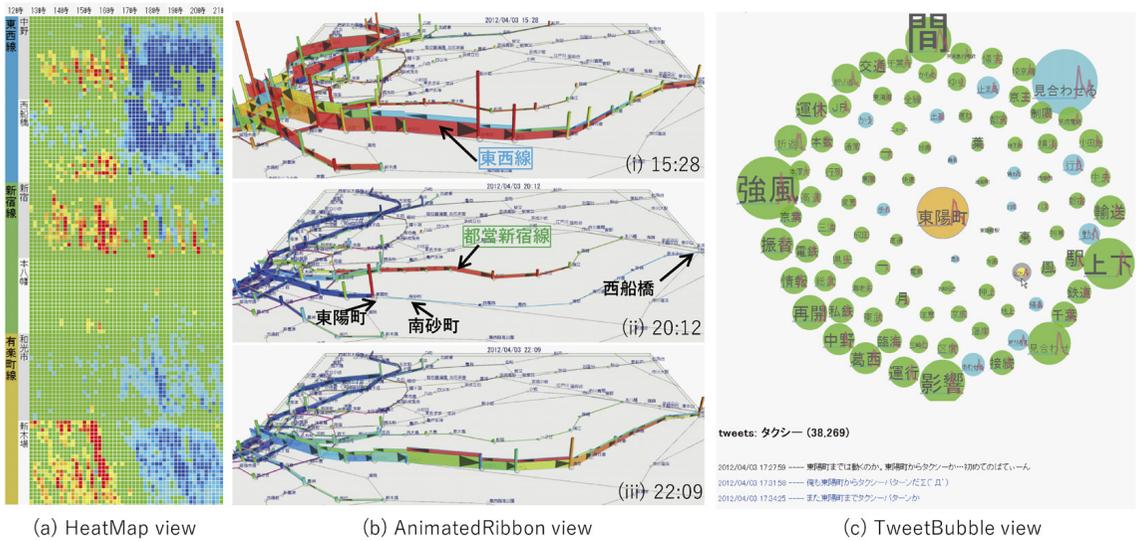


図3 スマートカードデータおよびツイッターデータを用いた旅客流動変化および要因・影響の探索システム（爆弾低気圧発生時の東京都東部における旅客流動変化の可視化事例）[13]

いる。一方、新宿駅では翌日の朝まで多くのツイートがあることがわかる。TimeFlux から上野駅では朝方に向けてツイート数が上昇していることが確認できる。

この例では、時空間キューブを用いているだけでなく、ツイート数を球のサイズとして表現することで、表1(e)も実現できることを示している。地図平面(TimeSlice)に指定時間に対応したツイート数および実際のツイートの表示も可能で、TimeSliceをスライドすることにより表示内容をアニメーションにより変更できる(表1(f))。さらに、TimeSliceを追加することによりスモールマルチプルも実現できる(表1(g))。

### 3.3 旅客流動変化の探索システム

大都市地下鉄における旅客流動の変化とその要因・影響に関して、スマートカードデータおよびツイッターデータという二つのビッグデータを統合し探索するための可視化システムを提案している(図3)[13]。

統合可視化環境として、まず、時空間を俯瞰し交通システム上の異常な事象を発見するためのHeatMap view(図3(a))、次に、複雑な鉄道ネットワーク上での異常の伝搬の詳細をアニメーションにより探索するためのAnimatedRibbon view(図3(b))、さらに、人々の発言から異常の要因・影響を探索するためのTweet-Bubble view(図3(c))を開発した。HeatMap viewは横軸が時間(10分間隔)、縦軸が路線・向き・区間を表しており、1行が1つの区間(たとえば「渋谷」-「表参道」)を表す。これにより、通常時とは異なる乗客数の区間がどの時間帯に多く存在しているかを探索

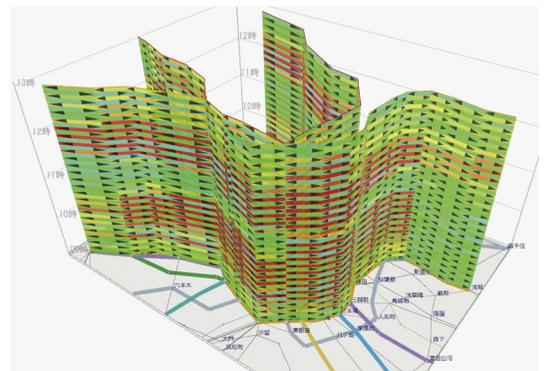


図4 時空間キューブによる時空間変化の可視化例 [13]

できる。AnimatedRibbon viewにおけるリボン(板のように立っているオブジェクト)の高さは、指定された時間および区間における乗客数を表す。同様にバーの高さは駅の出場者数を表す。HeatMap viewおよびAnimatedRibbon viewにおける色は平均値との違いを可視化している(赤:平均に比べて多い,青:平均に比べて少ない,緑:平均に近い)。TweetBubble viewでは、指定時間帯における選択された駅名もしくは路線名と共に共起する単語が表示される。単語のサイズから流行している単語を理解することができ、単語を選択することで具体的なツイートを見ることができ

図3の事例は、2012年4月3日、爆弾低気圧が発生した日の東京都東部における旅客流動の変化を探索した例である。この日は、前年の台風15号などの教

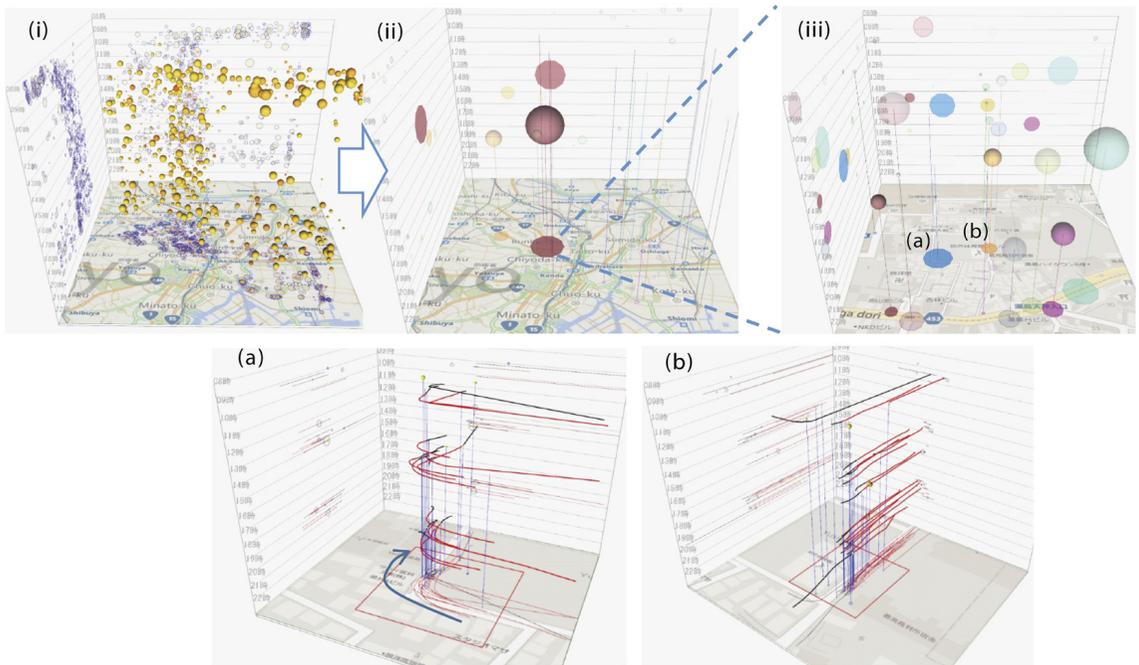


図5 大規模ドライブレコーダデータを用いた要注意領域探索のための3次元時空間可視化探索環境 [11]

訓から、多くの企業で早期帰宅を決定している<sup>3</sup>。東京メトロ東西線（以後、東西線）は、17時20分ごろに南砂町・西船橋間で強風のため運転を見合わせており、21時5分に運転を再開している。

図3(a)および(b)から、東京都心と東京都東部を結ぶ路線である、東西線、都営新宿線、および東京メトロ有楽町線が通常のラッシュアワーの前に非常に混み合っていることがわかる。また、東西線の運転見合わせ後、多くの乗客が東陽町駅から出場している様子が見て取れ、都営新宿線により東側への移動を始める人が通常時より増加している様子も見て取れる。さらに、東西線の運転再開後には、東京都心、西船橋に残った人々が、それぞれ東側、西側への移動を再開した様子がわかる。

図3(c)では、東西線が運転を見合わせていた時間帯における東陽町駅に共起する語をバブルチャートにより可視化している。語および円のサイズは頻度を表し、各円が重なり合わないよう配置されている。これらの語の中には「タクシー」、「バス」、「歩く」なども含まれており、人々が実際に東陽町からどのように移動したのか、その際どのような状況だったのかなどの詳細を調査できる。図の例では、「タクシー」を選択しており、図の下方にタクシーに関する実際のツイート

(の一部)が表示されている。

図3(a)に示すヒートマップでは、時間的な俯瞰はできるが、どの地点に関する情報なのかは駅名から推測するしか方法がない。一方、図3(b)はアニメーションにより時間変化(表1(c))を表現しており、大きな値の変化は読み取れるものの、時間的な俯瞰はできない。図4は、時空間キューブにより時間変化を俯瞰することを試みたプロトタイプである<sup>4</sup>。この例のように3D wall mapによる可視化(表1(a))を行った場合、複数の軌跡を同時に比較することは困難となる。また、値の絶対値が読み取りにくく、値が急激に増加している様子は表現できない。

### 3.4 ドライブレコーダデータを用いた時空間ヒヤリハット領域探索システム

図5は、ドライブレコーダデータに含まれるハンドル操作やブレーキ操作などの操作ログを時空間的に探索し、そこから運転上の要注意領域を発見するための可視化・探索インターフェースである [11]。

実験データとして、大手運送会社のドライブレコーダの実データを用いている。実験で利用しているドライブレコーダから取得できるデータには、0.5秒ごとに記録される軌跡データを含む経路走行データおよびブレーキ操作やハンドル操作など運転操作の発生

<sup>3</sup> <https://ja.wikipedia.org/wiki/2012年4月の低気圧>

<sup>4</sup> 図3の例とは異なる事例を用いているので注意されたい。

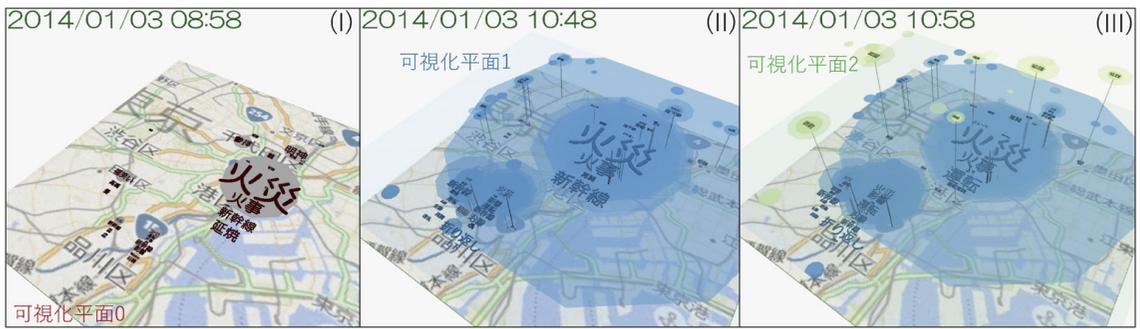


図6 多層地理空間ワードクラウドによる、2014年1月3日有楽町駅における火災発生日におけるイベント変遷の可視化例 [19]

時に記録される操作ログが含まれる。操作ログには、たとえばブレーキ操作の場合には速度、前後加速度、ジャーク（前後加速度の時間微分）などの属性値が含まれる。自治体が発表している資料から実際に事故が発生した場所を抽出し、それらを運転上注意を要する場所と考え、各領域における事故発生件数と同領域内操作ログから算出した要注意度の相関が高くなるような指標を求め、その指標に基づいて各操作の要注意度を算出している。詳細は文献 [11] を参照されたい。

ブレーキ・ハンドル操作は時間、および緯度経度情報を用いて時空間キューブ上に表示される (図 5(i))<sup>5</sup>。算出された要注意度を用いてノードの色とサイズを決定している。さらに、(i) は、算出した要注意度により各操作をフィルタリングし、要注意の大きな操作が集中している時空間領域を絞り込み表示した結果である。

3次元空間の散布図は、プロットが集中している領域を正確に把握しづらいという欠点がある。そこで、プロットの影を地平面および時間軸平面に表示することでプロットの3次元空間上での位置を認識しやすくしている。さらに、プロットを時空間キューブ内の位置情報を用いてクラスタリングすることでグループ化し、集約表示することにより、操作が集中している要注意時領域を容易に探索できるようにしている (図 5(ii) および (iii))。 (ii) で最も操作が集中している領域を見つけ、(iii) ではその領域を拡大表示し、より詳細を探索をしている。

図 5(iii) の地図上の下方に黄色で表示されているような大きな道路には多くの要注意領域があることがわかる。さらに、通常だと見逃しがちな路地のような場所においても (a) および (b) のような要注意領域を見つけることに成功している。図 5(a) および (b) は、

これらの領域を拡大表示し、操作の前後 10 秒間の軌跡を表示することで詳細な調査をした例である。赤は操作の前 10 秒の軌跡、黒は操作の後 10 秒の軌跡を表す。軌跡は地理平面および時間平面に影としても表示でき、詳細な観測を可能にする。

図 5(a) の例では、狭い道を右折した直後にブレーキ操作が多発している (通常はカーブの前にブレーキ操作が発生する)。図 5(b) の例では、直進している道路上にブレーキ操作が多発している。地図および運転軌跡により詳細を探索したところ、南進してきたドライバーが特定の門の前でブレーキ操作を行っていることがわかった。また、Google ストリートビューで調査したところ、人が出入りする門が電柱によりドライバーの視界には入らない環境になっていることが確認できた。

図 5 のシステムでは、要注意操作が集中している場所を探索するのみならず、どの時間に集中して発生しているかを同時に観測したいという要望にも応えるため、時空間キューブを用いている (表 1(a))。

### 3.5 位置参照表現に着目した実世界イベントの時空間可視化システム

都市空間などで日々発生するイベントの影響、時空間的な広がりを理解するため、ツイッターなどのマイクロブログストリーム中の位置参照表現に着目した実世界イベントの時空間可視化システムを構築した [19]。

図 6 に示すシステムでは、まず、マイクロブログストリーム中の各投稿中に現れる地名や施設名などの位置参照表現を認識する。次に、投稿中の各単語を認識した地名や施設名の位置に紐付けて、局所的に多く観測された単語をローカルイベントとして認識する。抽出されたローカルイベントは、地理空間ワードクラウドとして可視化される。一般的に、イベントに関連する単語は、時間と場所に応じて出現頻度が変化する。そのため、地理空間ワードクラウドでは時間経過に従っ

<sup>5</sup> 図 5 の例はブレーキ操作のみを用いている。

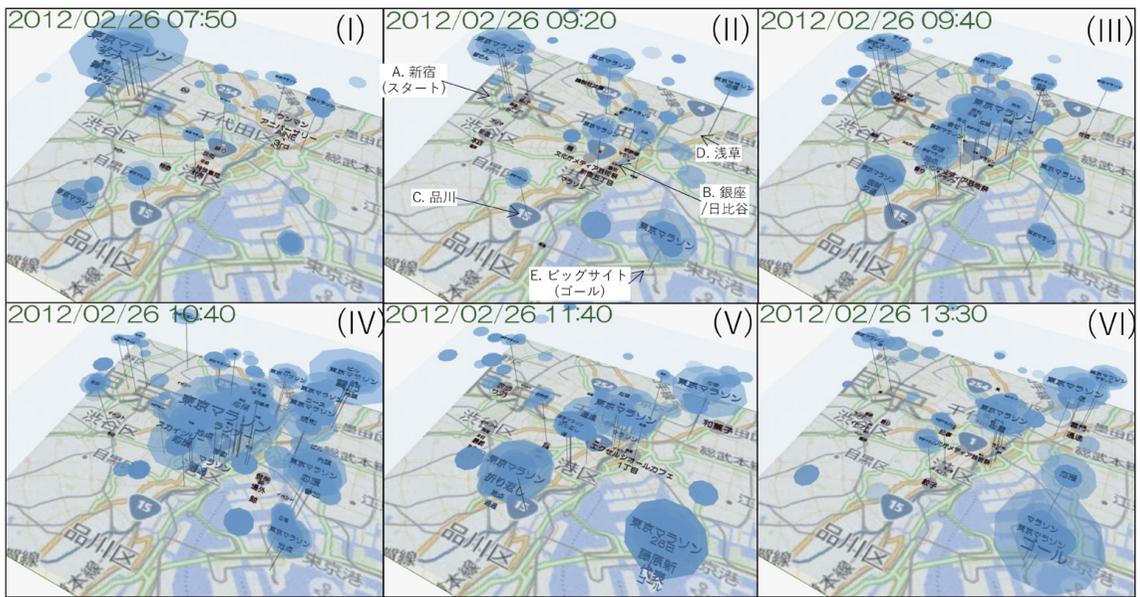


図7 多層地理空間ワードクラウドによる、東京マラソン 2012 開催日におけるイベント変遷の可視化例 [19]

表2 東京マラソン 2012 におけるランナーの各主要ポイント (図7(II)) のおおよその通過時刻

	A → B → C → B → D → B → E						
トップランナー	9:10	9:40	9:55	10:13	10:34	10:55	11:17
3 時間ランナー	9:11	9:53	10:15	10:41	11:10	11:40	12:11
6 時間ランナー	9:24	10:49	11:32	12:24	13:22	14:22	15:24

て、単語の表示サイズ、表示位置が変化する<sup>6</sup>。単語の出現数が特定の場所周辺に集中するほどその場所に表される単語のサイズは大きくなる。

多くの実世界イベントは、野球の試合やコンサートのような限定された場所で行われるが、地震やマラソンのような広範囲に及ぶイベントなども考えられる。そこで、ローカルイベント群からグローバルイベントを抽出し、それらを3次元空間における別レイヤに可視化し、多層地理空間ワードクラウド表現として可視化している。

図6は、2014年1月3日におけるJR有楽町駅の沿線火災発生後のイベントの時間変遷を可視化している。火災は午前6時半ごろ発生し、有楽町駅周辺が煙に包まれた影響で、東海道新幹線、JR山手線などが長時間にわたり運転を見合わせた。1月3日はまだ正月休みであり、人々が寺社に初詣に訪れる期間であるため、多くの人々の移動に影響を及ぼした。図6(I)においては、まだ早朝で人々の移動が始まっていないこと

もあり、火災イベントはローカルイベントの一つである。ローカルイベントは可視化平面0上に茶色の地理空間ワードクラウドとして表示されている。(II)においては、多くの人々が移動を開始し各所で移動できないトラブルに巻き込まれたため、火災イベントはグローバルイベントとして検出され、可視化平面1上に青色の地理空間ワードクラウドとして表示されていることがわかる。さらに、(III)の可視化平面2上には、主要な寺社周辺に初詣イベントが緑色の地理空間ワードクラウドとして出現していることが確認できる。

図7は、内容が変化し続けるイベントの例として、東京マラソン2012が開催された2012年2月26日におけるイベント変遷を可視化したものである。東京マラソンは毎年約35,000人のランナーが参加しており100万人以上の人々が沿道から観戦をしている。東京マラソン2012のコースは東京の西から東への移動、さらに南北間での二度の折り返しを含む(図7(II)におけるA → B → C → B → D → B → E)。完走する多くのランナーは約3時間から6時間でゴールしており、各主要観戦ポイントにおける通過時間は表2のようになっている。また、多くの人々がランナーを応

<sup>6</sup> 一般的なワードクラウドは、地理情報とは無関係であり、単語の表示位置は表示空間に効率よく配置することのみに注力するものが多い [25]。

援するために主要観戦ポイント間を移動し、状況をツイッターなどに投稿している。

図7(I)から(VI)では、“東京マラソン”という大きなグローバルイベントとそれに関連するさまざまなイベントがいつ、どの場所で出現するのか、その時間変遷を観測できる。それぞれの時間のスクリーンショットにおけるイベントのサイズと場所は、その時間におけるランナーの走行位置を反映している。関連イベントのサイズと場所からイベントの詳細状況を探索することが可能である。

本節で取り上げたシステムでは、複数イベントの情報を異なるレイヤとして3次元空間に重ねる2.5次元表現をとっており、時間変化はアニメーションにより実現している(表1(i))。

#### 4. まとめ

本稿では、時空間情報の可視化手法に関して、さまざまな手法をまとめ、分類した。紹介した手法には、それぞれ長所・短所があり、目的により使い分けることが求められる。さらに、具体的な時空間情報可視化のための3次元アプリケーション群を紹介した。詳細とさらなる事例については既発表論文[1, 11, 13, 19]を参照されたい。今後もGPSなどのセンサ群やソーシャルメディアなどの発達により、ますます多くの時空間情報が生み出され、時空間情報探索のための可視化システムが求められていくと考えられる。本稿が、その際の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

[1] 伊藤正彦, 豊田正史, 喜連川優, “構造を持つ時系列情報に関する3次元可視化フレームワーク,” 第19回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2011), pp. 42–47, 2011.

[2] T. Nagel and B. Groß, “Shanghai metro flow: Multiple perspectives into a subway system,” In *Proceedings of the IEEE VIS 2014 Arts Program*, pp. 137–138, 2014.

[3] I. Boyandin, E. Bertini and D. Lalanne, “A qualitative study on the exploration of temporal changes in flow maps with animation and small-multiples,” *Computer Graphics Forum*, **31**, pp. 1005–1014, 2012.

[4] G. L. Andrienko and N. V. Andrienko, “Spatio-temporal aggregation for visual analysis of movements,” In *Proceedings of 2008 IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*, pp. 51–58, 2008.

[5] Z. Wang, M. Lu, X. Yuan, J. Zhang and H. van de Wetering, “Visual traffic jam analysis based on trajectory data,” *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **19**, pp. 2159–2168, 2013.

[6] N. V. Andrienko and G. L. Andrienko, *Exploratory*

*Analysis of Spatial and Temporal Data: A Systematic Approach*, Springer, 2006.

[7] E. R. Tufte, *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press, 1992.

[8] D. T. Nhon, L. Wilkinson and A. Anand, “Stacking graphic elements to avoid over-plotting,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **16**, pp. 1044–1052, 2010.

[9] G. Andrienko, N. Andrienko, C. Hurter, S. Rinzivillo and S. Wrobel, “From movement tracks through events to places: Extracting and characterizing significant places from mobility data,” In *Proceedings of 2011 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*, pp. 161–170, 2011.

[10] T. Kapler and W. Wright, “Geotime information visualization,” In *Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization 2004*, pp. 25–32, 2004.

[11] M. Itoh, D. Yokoyama, M. Toyoda and M. Kitsuregawa, “Visual interface for exploring caution spots from vehicle recorder big data,” In *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Big Data*, pp. 776–784, 2015.

[12] C. Tominski, H. Schumann, G. Andrienko and N. Andrienko, “Stacking-based visualization of trajectory attribute data,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **18**, pp. 2565–2574, 2012.

[13] M. Itoh, D. Yokoyama, M. Toyoda, Y. Tomita, S. Kawamura and M. Kitsuregawa, “Visual exploration of changes in passenger flows and tweets on mega-city metro network,” *IEEE Transactions on Big Data*, **2**, pp. 85–99, 2016.

[14] M. Yasukawa, M. Kitsuregawa, K. Taniguchi and T. Koike, “PVES: Powered Visualizer for Earth Environmental Science,” *IEEE Systems Journal*, **2**, pp. 390–400, 2008.

[15] 磯田総子, 佐藤晋介, 花土弘, 高橋暢宏, 水谷文彦, 牛尾知雄, “フェーズドアレイ気象レーダによる豪雨の3次元観測,” 可視化情報学会誌, **34**(135), pp. 4–9, 2014.

[16] 新井直樹, “気象情報可視化ツールの開発,” 可視化情報学会誌, **34**(135), pp. 16–21, 2014.

[17] L. Yu, W. Wu, X. Li, G. Li, W. S. Ng, S. Ng, Z. Huang, A. Arunan and H. M. Watt, “iVizTRANS: Interactive visual learning for home and work place detection from massive public transportation data,” In *Proceedings of 2015 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*, pp. 49–56, 2015.

[18] T. Nagel, C. Pietsch and M. Dörk, “Staged analysis: From evocative to comparative visualizations of urban mobility,” In *Proceedings of the IEEE VIS 2016 Arts Program*, pp. 23–30, 2016.

[19] M. Itoh, N. Yoshinaga and M. Toyoda, “Word-clouds in the sky: Multi-layer spatio-temporal event visualization from a geo-parsed microblog stream,” In *Proceedings of 2016 20th International Conference Information Visualisation*, pp. 282–289, 2016.

[20] T. Hägerstrand, “Reflections on ‘What about people in regional science?’,” *Papers of the Regional Science Association*, **66**, pp. 1–6, 1989.

[21] F. Amini, S. Rufiange, Z. Hossain, Q. Ventura, P. Irani and M. J. McGuffin, “The impact of interactivity on comprehending 2D and 3D visualizations of movement data,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **21**, pp. 122–135, 2015.

- [22] M. Itoh, D. Yokoyama, M. Toyoda and M. Kit-  
suregawa, “Optimal viewpoint finding for space time  
cube to explore spatio-temporal characteristics of ve-  
hicle trajectories on crossroads,” In *Proceedings of the  
7th IEEE Symposium on Large Data Analysis and Vi-  
sualization*, pp. 94–95, 2017.
- [23] M. Itoh, J. Fujima, M. Ohigashi and Y. Tanaka,  
“Spreadsheet-based framework for interactive 3D visu-  
alization of web resources,” In *Proceedings of the 11th  
International Conference on Information Visualization*  
2007, pp. 65–73, 2007.
- [24] E. H. Chi, P. Barry, J. Riedl and J. A. Konstan, “A  
spreadsheet approach to information visualization,” In  
*Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Informa-  
tion Visualization*, pp. 17–24, 1997.
- [25] K. Koh, B. Lee, B. H. Kim and J. Seo, “Mani-  
Wordle: Providing flexible control over Wordle,” *IEEE  
Transactions on Visualization and Computer Graph-  
ics*, **16**, pp. 1190–1197, 2010.